管内紊流运动主要水力規律的研究

Φ.A.謝維列夫 著

建筑工程出版社

管內紊流運動主要水力規律的研究

徐在庸 譯

建筑工程出版社出版

·1957·

內容提要 本書詳細地論述了管內均勻紊流运动的諸問題。書中闡明管內流速分布規律和管路水力阻力的研究結果，并介紹了一些新的計算公式。

附录中列有本書所根据的实驗資料。

本書可供从事于压力管水力計算工作的工程师、技术人員，以及水力学的科学工作者参考之用。

原本說明

書　　名　ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ В ТРУБАХ

著　　者　Ф. А. Шевелев

出 版 者　Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре

出版地点及年份　Москва—1953

管內紊流运动主要水力
規律的研究

徐在庸　譯

※

建筑工程出版社出版（北京市阜成門外南禮士路）
（北京市書刊出版業營業許可証出字第052號）
建筑工程出版社印刷廠印刷・新華書店發行

書號564　150千字　850×1168 1/32　印張 6 11/16　插頁 1
1957年9月第1版　1957年9月第1次印刷
印數：1—1,150冊　定價(10)1.70元

目 录

序

苏联共产党第十九次代表大会拟定了进一步发展国民經济的雄偉計划。

按照党代表大会的決議，要实現巨大的水力工程建設。

为了順利地設計所要建立的建筑物起見，必須对若干問題进行新的專門研究，通过这些研究来拟定較为完善的計算建議和檢驗現有的解法。其中，也包括各种功用的压力管路的水力計算問題，在苏联压力管路的建設規模正在逐年扩大。

本論文中包括关于管內均勻紊流运动規律的研究的工作結果，这些結果是由全苏給水、排水、水工構筑物与工程水文地質研究所高級科学工作者技术科学副博士Ф.А.謝維列夫(Шевелев)研究得出的。

本論文討論了管內流速分布問題和管路水力阻力問題。由于將这兩个問題互相联系起来研究的結果，便得出适用于各种液体的新鋼管和新鑄鉄管水力計算的公式，以及考慮鋼質和鑄鉄質輸水管在使用过程中阻力增加現象的水力計算公式。根据这些公式，編出了計算表格❶。

本書系根据广泛的試驗資料編写的，其中包括直徑15.55～302.0公厘的人工和天然糙度的水管的实驗室試驗，以及直徑600～1200公厘的水管的实物測量。

在附录中列有試驗資料（已經过初步整理），这些資料是研究本論文中所討論的問題的基础。

全蘇上下水道水工建筑及工程水文地質研究所

---

❶ Ф.А.謝維列夫著："鋼管和鑄鐵管的水力計算表"，國立建筑書籍出版社，1953年俄文版。

主要字母符号❶

v_M——最大(轴向)流速；

v_{cp}——平均流速；

v'_{cp}——测量断面中的平均流速；

v——某一点的流速；

v_*——动力流速；

Q——流量；

h——管路区段上的水头损失；

Δp——压力落差；

d——水管内徑；

d'——测量断面的直徑；

r——水管内半徑；

ω——过水断面面积；

y——某一点上流速至管壁的距离；

y_{cp}——流速等于平均流速的那一点至管壁的距离；

R——水力半徑；

L——管路区段長度；

L_1——入口区段的長度；

L_2——出口区段的長度；

l——水管接头之間的距离；

γ——液体的比重；

ρ——液体的密度；

ν——液体的运动粘滯系数；

g——重力加速度；

t——溫度；

K_ν, Re——流动狀态的判別标准；

---

❶ 根据所推荐的术語(参看苏联科学院技术术語委員會："流体力学术語"，苏联科学院出版社，1952年俄文版)。

i——水力坡度，

λ——在下列公式中的沿程的摩擦阻力系数：

$$\Delta p=\lambda\frac{L}{d}\cdot\frac{v_{cp}^{2}\gamma}{2g};$$

λ_{R}——水力半徑的沿程的摩擦阻力系数；

λ_{KB}——在平方阻力区域中的总的(沿長度)摩擦阻力系数；

C——在公式 $v_{cp}=C\sqrt{Ri}$ 中的流速乘数；

C_{KB}——在平方阻力区域中的流速乘数；

ζ——在公式 $h=\zeta\frac{v_{cp}^{2}}{2g}$ 中的損失系数；

δ——絕对糙度；

Δ——相当絕对糙度；

n——糙度系数；

k_{T}——压力管的校准系数。

第一章　問題的討論情况及任务的提法

1.　本書中所研究的問題

液体在圓管中的层流运动狀态已求得令人滿意的答案，这一点是众所共知的。但是，在工程实踐中，最常遇到的是紊流运动力学，而它在頗大的程度上还未加以研究。

勃朗特尔—卡尔芒（Прандтл—Карман）理論（动量轉移）和泰勒（Тейлор）理論（渦漩轉移）是以紊动現象的概略图示、运动的直覺模型的建立为基础的。勃朗特尔—卡尔芒理論得到最大的声望。这个理論的拥护者通常指出，尼庫拉傑（Никурадзе）的試驗良好証实了这項理論。但是，这里却首先忽視了一項重要的見解，即正如苏联科学院通訊院士 M. A. 維里康諾夫（Великанов）所指出[1]❶的一样，在某种紊动理論的实驗室驗証工作中，应該測量表示紊动性本身的直接数量（瞬时速度的分布、其向量的方向、运动着的液体質点的軌迹形狀等），而不是如尼庫拉傑那样在試驗中去測量时均流速。从另一方面說，必須指出，尼庫拉傑的試驗只在相当有限的管徑范圍內进行的，并不具有常常硬加于它身上的那种“高度精确性”。后面我們將比較詳細地叙述这一点，这里只想指出尼庫拉傑在整理光滑管壁处的流速測量資料时，正如已确定的一样，他相信指導其工作的勃朗特尔理論的程度超过試驗資料。

用統計力学方法研究紊动性及作为其特征的运动混乱性和混杂性，是极为合理的。苏联学者就是沿着这条道路进行研究的。为 A. A. 弗利特曼（Фридман）所奠定基础的以及特别是在最近

---

❶ 方括弧[ ]內的數字系指書后參考書籍的目錄順序而言。

10～12年来为科学院院士 А.Н. 科尔莫哥罗夫(Колмогоров)[2、3]、苏联科学院通訊院士 М.А. 維里康諾夫[1、4]、Л.Г.洛依茨揚斯基(Лойцянский)[5]、А.М.奥布霍夫(Обухов)[6]等所发展的紊动性統計理論，是最有根据的理論。苏联学者不仅对紊动性統計理論問題进行了理論研究，而且在发展紊动机構方面还完成了若干准确的試驗工作[7、8等]。

紊动性統計理論研究方面所达到的成就，使得可以在最近几年內对于若干技术上的实际要求能作出具体答案。

但是，目前工程实踐已是迫切地要求改善現形的水力計算方法，尤其是管路的水力計算方法。水力学对于工程实踐中日益增長的要求应該作出答复。管路水力学的基本問題，就是水力阻力問題和紊变均匀运动时时均流速的分布問題，这也就是本書所要研究的問題。假如說第一个問題具有直接实际特性，則第二个問題——流速分布，除具有此特性之外，还有很大的理論意义。

必須指出，决不能把第一个問題与第二个問題分开来进行研究，因为水力阻力的規律与管中流速分布規律有直接的和密切的关系。此外，研究这兩种基本規律时，第二个問題应該放在第一个問題之前。

在轉到提出本書任务之前，必須簡述一下在紊变均匀运动时关于管內时均流速分布及其水力阻力的現有公式和試驗資料。

2. 管內流速分布的現有公式和試驗資料

現在为了表示流速图❶起見，应利用高次拋物綫和对数曲綫。在第一种情形下，应用下列形式的所謂冪次公式：

$$= v_{\mathrm{M}}\left(\frac{y}{r}\right)^{n} \tag{1}$$

必須指出，这个公式給出的流速分布曲綫在管軸处折断，这一

❶ 這里和后面都是指均匀運動時的時均(而不是瞬時)紊動流速而言。

点与曲綫自然光滑的通过极大点是不相符合的。

試驗确定，对于光滑管，公式1中的幂次指数是随Re值的变化而变化的，而对于粗糙管，此指数則随糙度的变化而变化的。这就是說，当Re增大或糙度減少时，幂次指数便減少，并且n的变化范圍可以大約規定如下：自$\frac{1}{4}$（糙度很大的水管）至$\frac{1}{10}$（当Re值很大时的光滑管）。

公式1对于流速分布与阻力之間并未得出直接的关系。但是，这个关系是存在的，因为n是随Re和糙度的变化而变化的，因而也随水管阻力的变化而变化的。

流速分布（更确切地說，是所謂“流速差”的分布）的对数公式，可以給出流速分布与阻力間的关系：

$$\frac{v_{м}-v}{v_{д}}=\frac{1}{\chi}\ln\frac{r}{y} \tag{2}$$

其中χ平常認为是“通用常数”，而

$$v_{д}=v_{cp}\sqrt{\frac{\lambda}{8}}$$

Л.Г.洛依茨揚斯基〔5〕曾提出一項假定，即对数公式可以被認为是幂次法則的包圍綫；B.B.伏依雪尔（Войшель）〔9〕証明这个假定是有根据的。

A.A.特魯凡諾夫（Труфанов）〔10〕曾試图采用积分液体运动微分方程式的方法来求得流速分布的对数公式。

不难相信，公式2能像公式1那样使流速分布曲綫在管軸处折断。实际上，公式2中的流速梯度为：

$$\frac{dv}{dy}=\frac{v_{д}}{\chi}\times\frac{1}{y}$$

因此，对于管軸($y=r$)，$\frac{dv}{dy}=\frac{v_{д}}{\chi r}$代替了

$$\frac{dv}{dy}=0$$

此外，对管壁上的点($y=0$)，这个公式自然也不适用，因为$\frac{dv}{dy}=\infty$。

公式 2 虽然有上述的缺点，但是由于它比較簡單，具有与阻力的关系和符合試驗資料的緣故，它被广泛的利用着，同时它不仅被建議应用于压力圓管的液体运动中，而且还用于水渠和河流中，以及狭縫中。

根据尼庫拉傑的試驗資料〔11、12〕，通常認为对于水管 $\chi=0.4$。

按照公式 2，我們可以写成：

$$\frac{v_{м}-v_{ср}}{v_{д}}=\frac{1}{\chi}\ \ln\frac{r}{r_{ср}}=\beta \tag{3}$$

根据勃朗特尔的观念，β是"平均流速差的常数"，并等于4.07。

利用公式 2 时，众所周知，由于积分的結果，求得表示平均流速差的下列式子：

$$\frac{v_{м}-v_{ср}}{v_{д}}=\frac{1.5}{\chi} \tag{4}$$

所以数値 $\beta=4.07$ 相当于：

$$\chi=\frac{1.5}{4.07}=0.368$$

而根据尼庫拉傑的試驗，得出：

$$\beta=\frac{1.5}{0.4}=3.75$$

A.A.沙特凱維奇〔13〕認为，为了要使公式 3 与勃朗特尔——尼庫拉傑对于光滑管和粗糙管阻力的公式相符合，应該令 β 等于 3.56。

这样，关于勃朗特尔理論巳被尼庫拉傑試驗很好証实了的这种現存观念，在頗大程度上是一种錯覺。

应用于其他类型的水流，按照不同的資料，χ 与β 値的变化范圍更大得多。

对于水渠和河流，M.A.維里康諾夫〔1〕將χ数值暫定取为与对于水管一样，即等于 0.4。由于小型粗糙槽的試驗結果，建議用数値 $\chi=0.33$〔14〕。在整理巴仁(Базен)試驗結果时，对于寬度比

深度約大 4 倍(及 4 倍以上)的水渠，求得 $\beta=2.13$，而对于寬度較小的水渠，則$\beta=4.50$[15]。

按照水文测驗資料的数据，Г.В.热列兹尼亞科夫(Железняков)[14]确定了对于河流的平均值 $\varkappa=0.54$，并且发現数值 β 是随着水流大小的增大而增長(自 $\omega v_M=50$ 时的 4 增加到 $\omega v_M=300$立方公尺/秒时的7)。Г.В.热列兹尼亞科夫提出了依 ωv_M 而定的 β 值近似表，但是，由于水文測驗資料的不完备和其精确度不够，他未能确定出这个关系的公式。

Г.М.洛米則(Ломизе)[16]由于狹縫中压力流阻力的測量結果，求得光滑狹縫的 $\varkappa=0.415$，粗糙狹縫的 $\varkappa=0.328$。

这样，虽然流速分布的对数公式已为試驗資料所証实，而关于数值 $\varkappa$ 与 β 的問題还仍未弄清；但是現在已經可以这样說，即它們并不是"通用常数"。

这个問題的解决具有极大的意义，因为数值 $\varkappa$ 与 β 的变化会使流速断面发生重要变化。数值 β 的变化对于沿長度的摩擦阻力系数λ❶ 的影响特别剧烈，因为它与 β 成平方关系。实际上，从方程式 3 可以得出：

$$\lambda=\frac{\left(\frac{v_M}{v_{cp}}-1\right)^2 8}{\beta^2} \tag{5}$$

为了进一步研究关于流速分布問題(尤其是关于 $\varkappa$ 与 β 的数值)，必須进行專門的研究，其中一定要在广泛的范圍內进行取得管內流速图的新試驗。可惜的是，到目前为止还沒有进行过这种試驗，而这个問題的进一步研究就循着另一些途徑进行，并且为了驗証与圓管內流速分布有关的某些理論結構时，只繼續使用尼庫拉傑的資料。

П.К.康納科夫(Конаков)[17]力图消除公式 2 的缺点，也就是使 $y=r$ 时的流速梯度不等于零，他提出下列方程式：

❶ 沿長度的摩擦阻力系数在后面就簡稱为阻力系数。

$$\frac{v_{\text{м}}-v}{v_{\text{д}}}=-\frac{1}{\varkappa}\left(2\sqrt{1-\frac{y}{r}}-\ln\frac{1+\sqrt{1-\frac{y}{r}}}{1-\sqrt{1-\frac{y}{r}}}\right) \tag{6}$$

式中 $\varkappa=0.228$。

但是，正如П.К.康納科夫本人所指出的一样，这个复杂的方程式与尼庫拉傑的試驗資料相符合的程度比簡單的公式2还要坏。

"滲混途徑長度"和管壁距离之間成正比的假定，是勃朗特尔在其紊流理論中无根据的假設之一。众所周知[18]，这个原理是与尼庫拉傑的試驗資料相矛盾的，按照尼庫拉傑的試驗資料，"滲混途徑長度"是以另一种方式分布着。А.Д.阿尔特苏尔(Альтшуль)[19]基本上采用了勃朗特尔的切应力方程式，并采用了另一种"滲混途徑長度"的关系式，試图緩和上述矛盾。結果，他求得表示流速差分布的一个相当复杂的关系式：

$$\frac{v_{\text{м}}-v}{v_{\text{д}}}=\frac{1}{k}\left(\frac{1}{2}\ln\frac{1+\sqrt{1-\frac{y}{r}}}{1-\sqrt{1-\frac{y}{r}}}-\operatorname{arc\,tg}\sqrt{1-\frac{y}{r}}\right) \tag{7}$$

式中 k——常数，等于0.16。

对方程式6和7的研究指出，当 $y=r$ 时，它們符合流速梯度等于零的条件，但在 $y=0$ 时，就与簡單的公式2一样，導致同样的荒謬結論。

我們权且把关于紊动机構新假定的适宜性与可能性問題放在一边不談(采用这些假定来推導方程式6和7时，并沒有經过試驗証实)，我們要指出，研究П.К.康納科夫[17]和А.Д.阿尔特苏尔[20]的阻力問題时，不能利用他們所提出的复杂的流速分布关系，而宁願利用簡單的公式2。

3. 决定管路水力阻力的現有公式和試驗資料

1) 光滑管

水力学方面所謂的光滑管通常是指在技术上这样的光滑管，如像新的无縫銅管和黄銅管，以及作得很好的新玻璃管和新鉛管。人人皆知，对于光滑管的阻力系数，布里亚齐烏斯(Блязиус)的公式[21]和勃朗特尔——尼庫拉傑的公式[11]，只当运动狀态判别标准Re值在一定的范圍内才是有效的。最近，苏联学者对光滑管阻力系数提出一些新的公式，这些新公式在广泛的Re值的范圍内有效。A.K.雅基莫夫(Якимов)[22]提出了下列公式：

$$\lambda_{гл}=\frac{e^{\frac{1}{\sqrt{\lambda_{гл}}}}}{Re} \tag{8}$$

公式8的缺点，就在于必須用逐次近似法来确定$\lambda_{гл}$。

П.K.康納科夫的公式[23]如下：

$$\lambda_{гл}=\frac{1}{(1.8\lg Re-1.5)^2}$$

或

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{гл}}}=1.8\lg\frac{Re}{6.81} \tag{9}$$

Г.K.菲洛寍科(филоненко)[24]提出对于Re值>5000时有效的下列公式：

$$\lambda_{гл}=\left(\frac{0.55}{\lg\frac{Re}{8}}\right)^2$$

这个公式經过簡單的換算就可以写成：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{гл}}}=1.82\lg\frac{Re}{100}+2 \tag{10}$$

后来，A.Д.阿尔特苏尔[25]也得出关系式 10。从表 1 中可看出，直到很大的 Re 值为止，公式 8、9 和 10 得出的 $\lambda_{гл}$ 值都很接近。

按照 Л.К.雅基莫夫、П.К.康納科夫、Г.К.菲洛涅科的公式和近似公式 42 来計算的光滑管阻力系数值　　表 1

R_e	$\lambda_{гл}$			
	按公式 8	按公式 9	按公式 10	按公式 42
5000	0.0368	0.0376	0.0386	0.0365
10000	0.0306	0.0307	0.0315	0.0311
30000	0.0233	0.0232	0.0236	0.0243
50000	0.0207	0.0207	0.0210	0.0217
100000	0.0178	0.0178	0.0180	0.0185
300000	0.0143	0.0144	0.0146	0.0145
500000	0.0130	0.0131	0.0131	0.0129
1000000	0.0114	0.0116	0.0116	0.0111
3000000	0.00950	0.00972	0.00975	—
5000000	0.00876	0.00900	0.00900	—
10000000	0.00787	0.00811	0.00810	—

但是，应該注意，上述公式都是以无縫黄銅管中所作的試驗作为基础的。对于在技术上其他类型的光滑管来說，$\lambda_{гл}$ 的数值可能有一些不同，特别是当Re值很大时。

2）粗糙管

假如說对于决定光滑管的水力阻力具有足够的資料，则关于粗糙管的阻力問題（它在实踐中是最为常見的）却未能适当地加以解决。解决这个問題的主要障碍就是天然粗糙表面的多种多样性。

这里不能敘述很多研究者的工作，他們使用試驗資料系統化的方法力求經驗地确定出管内水头損失与各种因素的关系❶，我

❶ 在П.Ф.尉爾巴契夫（Горбачев）〔26〕的著作中可以找到130个經驗公式的詳細敘述。

們指出，甚至到現在为止，对于輸送各种液体（水、石油、空气等）的新管的計算，仍应用各种不同的經驗公式，显然，虽然在各种液体沿新管流动时应該观察到同一的規律性。

对于水流，我們主要应用水头損失与流量成平方关系的所謂平方公式。某些时候，形式簡單的經驗指数公式得到广泛的傳播：

$$C_{\text{кв}}=\frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}} \tag{11}$$

因为 $C=\sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$❶，而 $R=\frac{d}{4}$，所以，假如將这个公式推行到压力管中，則可以写成：

$$\lambda_{\text{кв}}=124.6\frac{n^2}{\sqrt[3]{d}}$$

院士H.H.巴甫洛夫斯基（Павловский）[27]整理了主要为无压力流的許多試驗資料之后，早在1925年就首先确定，R的冪次指数不是一个常数（例如，像公式11一样），而应是一个变数，他提出了下列公式：

$$C_{\text{кв}}=\frac{1}{n}R^{y} \tag{12}$$

式中 $y=2.5\sqrt{n}-0.13-0.75\sqrt{R}(\sqrt{n}-0.10)$。

对于压力圓管，公式12具有以下形式：

$$\lambda_{\text{кв}}=4^{2y}\cdot 8g\frac{n^2}{d^{2y}} \tag{12a}$$

H.H.巴甫洛夫斯基的这項建議，对于平方阻力区域內，即对于水头損失与流量成平方关系的区域內水流的水力計算，是一項巨大的成就。

勃朗特尔——尼庫拉傑的平方公式[12]是力图确定通用关系式的結果：

---

❶ 原書 $C=\frac{\sqrt{8g}}{\lambda}$ 實爲 $C=\sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ 之誤——譯者注。